

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 534.1:534-16:534-8

**СТЕПАНЕНКО**  
Дмитрий Александрович

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.11.06 – акустические приборы и системы

Минск 2020

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный  
консультант

**ВАСИЛЕВИЧ Юрий Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и механика материалов» Белорусского национального технического университета

Официальные  
оппоненты:

**КОРЗЮК Виктор Иванович**, академик НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математической кибернетики Белорусского государственного университета;

**САКЕВИЧ Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики и технической механики УО «Витебский государственный технологический университет»;

**ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая  
организация

ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 21 февраля 2020 года в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д.02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 20 января 2020 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д.02.05.03, доктор технических наук, профессор

О. Г. Девойно

© Степаненко Д. А., 2020

© Белорусский национальный технический университет, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ультразвуковые акустические системы (УЗАС) широко применяются в медицине, в частности, в сердечно-сосудистой хирургии для ультразвуковой тромбэктомии (процедура разрушения тромбов), являющейся минимально-инвазивной (малотравматичной) хирургической операцией и обеспечивающей селективность разрушения тромба и сокращение послеоперационного восстановительного периода, и для ультразвуковой терапии опухолей кожи, которая в сочетании с лучевой терапией позволяет повысить эффективность лечения по сравнению с независимым применением указанных терапевтических методов. Актуальность применения УЗАС в медицине объясняется высокой частотой возникновения указанных заболеваний: частота возникновения венозных тромбозов составляет 160 случаев на 100 000 человек населения, а рак кожи составляет до 25 % в общей статистике онкологических заболеваний. УЗАС также находят широкое применение в технике, в частности, для ультразвуковой сварки, позволяющей производить холодное соединение чувствительных к перегреву электронных компонентов без предварительной подготовки поверхностей, и в ультразвуковых приводах (УЗП), имеющих по сравнению с другими типами приводов малые размеры, простую конструкцию, высокий КПД и низкое энергопотребление и используемых в хирургических роботах, медицинских диагностических и терапевтических устройствах, приводах автофокусировки объективов и часовых механизмах. Указанные преимущества, связанные с использованием УЗАС, приводят к расширению областей их применения и необходимости разработки новых и совершенствования существующих принципов построения УЗАС, а также методик их расчета и проектирования. Основным элементом УЗАС, обеспечивающим усиление колебаний по амплитуде и их передачу к обрабатываемому материалу или среде, является ультразвуковой волновод (УЗВ). Конструктивно все применяемые в УЗАС волноводы можно разделить на кольцевые и стержневые, которые в свою очередь делятся на простые, имеющие одинаковый профиль и постоянные свойства материала по всей длине, и составные, состоящие из нескольких последовательно соединенных участков с различным профилем и/или различными механическими свойствами материала. Преимуществом составных УЗВ является возможность их оптимизации одновременно по нескольким эксплуатационным характеристикам путем варьирования профиля и конструктивных параметров участков. Кольцевые УЗВ обеспечивают возможность трансформации продоль-

ных колебаний в изгибные и обратно и всестороннего воздействия на охватываемую ими биологическую или технологическую среду. В настоящее время проектирование УЗАС производится в основном на основе экспериментальных методов, существенным недостатком которых является необходимость выполнения значительного объема опытно-конструкторских работ по определению конструктивных параметров, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики УЗАС. Также применяются механико-математические методы проектирования и расчета УЗАС, которые можно разделить на аналитические и численные. Аналитические методы позволяют исследовать влияние конструктивных параметров УЗАС на их эксплуатационные показатели (проводить параметрический анализ), однако они применимы только для элементов УЗАС простого профиля, для которых дифференциальное уравнение колебаний может быть проинтегрировано в квадратурах. Численные методы применимы для элементов УЗАС произвольного профиля, однако они усложняют проведение параметрического анализа УЗАС, так как требуют многократного повторения расчетов для каждого набора значений варьируемых конструктивных параметров. В связи с широким применением УЗАС в медицине и технике важной и актуальной народно-хозяйственной проблемой является разработка и внедрение новых методов расчета и проектирования УЗАС, позволяющих проводить параметрический анализ и оптимизацию УЗАС с произвольным числом элементов произвольного профиля. Решение этой проблемы возможно на основе развития комбинированных численно-аналитических алгоритмов расчета и проектирования, сочетающих в себе достоинства известных аналитических и численных методов, применение которых позволит упростить параметрический анализ и оптимизацию эксплуатационных характеристик УЗАС, а также дать научное обоснование новых конструктивных схем построения УЗАС и устройств на их основе для более широкого применения в хирургии и терапии, ультразвуковой сварке, УЗП и других сферах деятельности человека.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тематика диссертационной работы была включена в планы НИР Белорусского национального технического университета, утвержденные Советом университета и согласованные с Министерством образования Республики Беларусь: ГБ 06-274 «Повышение качества изделий прибо-

ростроения, медицинской техники и ювелирного производства на основе совершенствования технологий, конструкций, методов контроля и испытаний» (сроки выполнения 2006–2010 гг.), ГБ 42-11-240 «Разработка высокоэффективных технологий, создание и совершенствование конструкций, методов контроля изделий приборостроения, ювелирного производства, медицинской и бытовой техники» (сроки выполнения 2011–2015 гг.). Ряд результатов, составляющих содержание диссертационной работы, получен в рамках выполнения отдельного проекта Министерства образования Республики Беларусь ГБ 09-46 «Разработать теоретические основы создания ультразвуковых приводов, работающих в режиме управляемого резонанса, для применения в технике и медицине» (сроки выполнения 2009–2010 гг.) и совместного белорусско-литовского проекта Г11ЛИТ-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по теме «Теоретическое и экспериментальное исследование свойств эластичных биологических материалов при воздействии механических колебаний высокой частоты» (сроки выполнения 2011–2012 гг.). Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22 апреля 2015 г., в частности, направлению 4 «Медицина, фармацевтика, медицинская техника».

#### **Цель и задачи исследования**

**Целью работы** является совершенствование методов расчета и проектирования УЗАС для использования в медицине и технике (ультразвуковая терапия и хирургия, ультразвуковая сварка, УЗП) и научное обоснование новых конструктивных схем построения УЗАС и устройств на их основе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести комплексный анализ существующих конструктивных схем построения УЗАС, используемых в медицине и технике, и методов их расчета и проектирования.
2. Разработать новые методы расчета и проектирования УЗАС, а также математические модели и методы расчета параметров их взаимодействия с биологическими и технологическими средами.
3. Выполнить апробацию разработанных моделей и методов на примерах реальных практических задач расчета и проектирования УЗАС, используемых в медицине и технике, и верифицировать результаты их применения с помощью известных методов расчета, моделирования и экспериментальных исследований.

4. Для рассмотренных задач расчета и проектирования установить связи между конструктивными параметрами УЗАС и их эксплуатационными характеристиками (собственными частотами колебаний, коэффициентом усиления колебаний по амплитуде, параметрами создаваемого системой акустического поля) и на основе установленных связей определить значения конструктивных параметров, обеспечивающие достижение оптимальных эксплуатационных характеристик.

5. Дать научное обоснование новых конструктивных схем построения УЗАС и устройств на их основе.

### **Научная новизна**

1. Разработан метод расчета и проектирования УЗАС, отличающийся от известных совместным применением аналитических методов решения уравнений колебаний для элементов УЗАС простого профиля и численных методов для элементов сложного профиля и позволяющий производить параметрический анализ и оптимизацию УЗАС независимо от числа и профилей их элементов.

2. Разработан метод расчета параметров акустических полей, создаваемых стержневыми УЗВ в жидких средах, отличающийся от известных совместным применением метода граничных элементов и метода зеркального источника, что дает возможность сведения задачи расчета акустических полей в жидком полупространстве к более простой задаче расчета акустических полей в однородном бесконечном пространстве, и позволяющий исследовать связи между конструктивным исполнением рабочих окончаний стержневых УЗВ и величиной амплитуды создаваемого ими акустического давления, определяющей эффективность воздействия ультразвука на среду.

3. Разработана математическая модель колебаний кольцевых УЗВ с учетом взаимодействия с упругой биологической средой, отличающаяся от известных представлением охватываемого волноводом биологического материала в виде винклеровской упругой среды с жесткостью, зависящей от порядка моды колебаний, что дает возможность учета двустороннего характера связи между упругими свойствами биологической среды и собственными частотами колебаний волновода, и позволяющая проводить параметрический анализ кольцевых УЗВ с учетом их взаимодействия со средой и оптимизацию частот колебаний УЗВ, обеспечивающих возможность воздействия на биологический материал в заданном диапазоне изменения диаметра охватываемого волноводом объема среды.

4. Впервые проведены теоретические исследования влияния наличия асимметрии и ее характера (геометрическая асимметрия ротора и

асимметрия колебаний статора) на работоспособность и динамику УЗП вращательного движения, основанного на генерации вращающего момента с помощью акустических радиационных сил, базирующиеся на применении теории акустических радиационных сил и качественной теории нелинейных дифференциальных уравнений и позволившие установить необходимые условия работоспособности привода и обосновать возможность управления его динамикой, в частности, числом положений устойчивого равновесия ротора, за счет асимметричного изменения конструктивных параметров.

5. Впервые проведены теоретические исследования усиления колебаний по амплитуде кольцевыми УЗВ с различным конструктивным исполнением (различными законами изменения площади поперечного сечения и механических свойств материала по длине окружности) и различными режимами функционирования (резонансные или нерезонансные колебания), базирующиеся на применении метода конечных элементов и метода передаточных матриц, и позволившие установить принципы усиления колебаний кольцевыми УЗВ в зависимости от их конструктивного исполнения и режима функционирования и дать научное обоснование применения кольцевых УЗВ в качестве элементов УЗАС, обеспечивающих усиление колебаний по амплитуде, что является качественно новым подходом к построению УЗАС.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод расчета и проектирования УЗАС, включающий аналитическое определение передаточных матриц для элементов УЗАС простого профиля (цилиндрического, конического, катеноидального, экспоненциального, гауссова или бесселева) и численное определение передаточных матриц для элементов сложного профиля, расчет общей передаточной матрицы УЗАС и получение на ее основе условий резонанса УЗАС, на основе применения которого получены решения задач расчета и проектирования волноводов для ультразвуковой тромбоэктомии и волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов изделий электронной техники; установлены связи между оптимальными значениями конструктивных параметров волноводов для ультразвуковой тромбоэктомии, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой продольных колебаний, а также связи между коэффициентами влияния погрешностей конструктивных параметров на собственную частоту и ее номинальным значением.

2. Метод расчета параметров акустических полей, создаваемых стержневыми УЗВ в жидких средах, включающий расчет распределе-

ния амплитуды колебательной скорости по поверхности УЗВ и определение амплитуды акустического давления на поверхности УЗВ путем совместного применения метода граничных элементов и метода зеркального источника, использование которого позволило установить связи между конструктивным исполнением рабочих окончаний стержневых УЗВ и величиной амплитуды создаваемого ими акустического давления, которая в случае волноводов для ультразвуковой тромбэктомии является основным фактором, определяющим производительность кавитационного разрушения биологического материала.

3. Математическая модель колебаний кольцевых УЗВ с учетом взаимодействия с упругой биологической средой, базирующаяся на представлении охватываемого волноводом биологического материала в виде винклеровской упругой среды с жесткостью, зависящей от порядка моды колебаний, и использовании условия резонанса изгибных колебаний заполненного винклеровской упругой средой кругового кольца, связывающего собственные частоты колебаний волновода с его конструктивными параметрами, на основе применения которой получено решение задачи проектирования кольцевых УЗВ терапевтического назначения и оптимизированы частоты колебаний УЗВ, обеспечивающие возможность воздействия на биологический материал в заданном диапазоне изменения диаметра охватываемого волноводом объема среды.

4. Результаты теоретических исследований влияния наличия асимметрии и ее характера (геометрическая асимметрия ротора и асимметрия колебаний статора) на работоспособность и динамику УЗП вращательного движения, основанного на генерации вращающего момента с помощью акустических радиационных сил, на базе которых установлены требования к характеру асимметрии привода, выполнение которых необходимо для обеспечения его работоспособности; обоснована возможность управления динамикой привода, в частности, полного устранения положений устойчивого равновесия ротора, за счет асимметричного изменения его конструктивных параметров.

5. Результаты теоретических исследований усиления колебаний по амплитуде кольцевыми УЗВ с различным конструктивным исполнением (различными законами изменения площади поперечного сечения и механических свойств материала по длине окружности) и различными режимами функционирования (резонансные или нерезонансные колебания), на базе которых установлены принципы усиления колебаний нерезонансными кольцевыми УЗВ с постоянными значениями параметров по длине окружности и резонансными кольцевыми УЗВ с окружным изменением параметров; дано научное обоснование примене-



ния кольцевых УЗВ в качестве элементов УЗАС, реализующих функцию усиления колебаний по амплитуде, что является качественно новым принципом построения УЗАС.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Основные научные и практические результаты, представленные в диссертации, получены лично автором при консультировании д-ра физ.-мат. наук Василевича Ю.В. Соавторы научных публикаций, результаты которых вошли в диссертацию, принимали участие в проведении экспериментальных исследований (Богданчук К.А., Бобровская А.И., канд. техн. наук Минченя В.Т.), выборе методик и обсуждения результатов исследований (канд. техн. наук Минченя В.Т., д-р техн. наук Бубулис А.).

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты работы представлены на следующих международных научно-технических конференциях: 4-я – 6-я международные конференции молодых биомедицинских инженеров и исследователей (г. Кошице, Словакия, 2010 г.; г. Прага, Чешская Республика, 2012 г.; г. Братислава, Словакия, 2014 г.), Международный конгресс по ультразвуку (г. Гданьск, Польша, 2011 г.), Международный симпозиум IEEE по ультразвуку (г. Дрезден, ФРГ, 2012 г.), Бело-русско-корейский научно-технологический семинар (г. Минск, 2011 г.), 41-й Республиканский научно-методический семинар «Применение методов компьютерной механики в инженерии, науке, образовании» (г. Минск, 2010 г.), 2-я – 6-я и 8-я – 11-я МНТК «Приборостроение» (г. Минск, 2009–2013 гг., 2015–2018 гг.), 6-я и 8-я МНТК «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2008 г., 2010 г.), МНТК «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы» (г. Витебск, 2016 г.).

Результаты исследований использованы в производственном процессе Республиканского инновационного унитарного предприятия (РИУП) «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» для расчета геометрических параметров составных стержневых волноводов для ультразвуковой тромбэктомии и кольцевых волноводов для ультразвуковой терапии опухолей и в производственном процессе ОАО «Планар-СО» для расчета геометрических параметров составных стержневых волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов, применяемых при сборке изделий электронной техники.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 50 научных работах, в том числе в одной монографии (19,4 авторских листов), 19 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (12,6 авторских листов), 5 статьях в научных журналах, 2 статьях в сборниках научных трудов, 18 статьях в сборниках материалов конференций и 5 патентах.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит введение, общую характеристику работы, 6 глав, заключение, список использованных источников и приложения. Она изложена на 323 страницах, включает 122 рисунка, 12 таблиц и библиографический список из 276 наименований, в том числе 50 публикаций соискателя.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена комплексному анализу существующих конструктивных схем построения УЗАС, применяемых в медицине и технике, и методов их расчета и проектирования.

В медицине УЗАС применяются для сварки и резки костей и мягких биологических тканей, замещения дефектов костной ткани путем наплавки полимерного материала, а в технике – в качестве элементов УЗП, для ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов, сварки и очистки.

Особенно перспективным является применение в медицине и технике УЗАС с гибкими УЗВ. В частности, гибкие УЗВ применяются в сердечно-сосудистой хирургии для восстановления кровотока через кровеносные сосуды, утратившие проходимость в результате атеросклероза или тромбоза (эндартерэктомия и тромбозэктомия). Особенностью гибких УЗВ является малая изгибная жесткость, достигаемая за счет большого отношения длины к диаметру и позволяющая вводить их в глубокие отверстия и каналы сложной геометрической формы за счет упругой деформации. Составные стержневые УЗВ, состоящие из нескольких участков с различным профилем продольного сечения, по сравнению с простыми УЗВ могут быть оптимизированы одновременно по нескольким эксплуатационным характеристикам, например, собственной частоте и коэффициенту усиления колебаний, за счет варьирования профиля и конструктивных параметров участков. Помимо стержневых УЗВ в медицине и технике находят применение кольцевые УЗВ, обеспечивающие

возможность трансформации продольных колебаний в изгибные и обратно и возможность всестороннего воздействия на охватываемую волноводом биологическую или технологическую среду.

Для аналитического решения задач расчета и проектирования УЗАС могут использоваться метод входного механического импеданса и метод прямого решения дифференциального уравнения колебаний. Уравнение Вебстера, описывающее продольные колебания, тесно связано с уравнением Шрёдингера, для которого в квантовой механике разработаны аналитические методы решения. Задача об определении собственных частот и форм колебаний УЗАС также может быть сведена к задаче Штурма-Лиувилля на собственные значения. Однако, несмотря на наличие ряда аналитических методов расчета и проектирования УЗАС, все они являются применимыми лишь для ограниченного класса профилей входящих в состав УЗАС элементов. Достоинством аналитических методов является простота их применения для параметрического анализа УЗАС, то есть для исследования зависимостей между конструктивными параметрами и эксплуатационными характеристиками системы. К численным методам расчета и проектирования УЗАС относятся метод конечных элементов (МКЭ), а также различные численные методы решения задачи Штурма-Лиувилля. Достоинством численных методов является их применимость для расчета и проектирования составных УЗАС с произвольной формой элементов, однако они усложняют параметрический анализ УЗАС. В связи с широким применением составных УЗАС, содержащих как участки простых профилей (допускающих интегрирование уравнения колебаний в квадратурах), так и участки сложных профилей (требующих численного решения уравнения колебаний), в качестве перспективного направления исследований сформулирована разработка комбинированных численно-аналитических методов расчета и проектирования УЗАС, сочетающих в себе достоинства численных и аналитических методов.

Значительный вклад в решение задач расчета и проектирования УЗАС медицинского назначения внесен работами таких исследователей как А.А. Новиков и С.Е. Квашнин, однако использованные ими методы расчета и проектирования не обладают достаточной универсальностью. В частности, А.А. Новиков использует для анализа УЗАС метод входного механического импеданса, однако он не приводит общего алгоритма расчета импеданса для элементов УЗАС произвольного профиля.

Исходя из изложенного, актуальными народно-хозяйственными проблемами являются совершенствование методов расчета и проекти-

рования УЗАС для использования в медицине и технике, в частности, разработка методов, позволяющих проводить параметрический анализ и оптимизацию составных УЗАС с произвольным числом элементов произвольного профиля, и научное обоснование новых конструктивных схем построения УЗАС и устройств на их основе для более широкого применения в медицине и технике.

На основании анализа изложенного материала сформулированы цель и задачи работы.

**Вторая глава** посвящена разработке численно-аналитических методов расчета и проектирования УЗАС. Одним из объектов исследования являются составные стержневые УЗВ, схема конструкции которых приведена на рисунке 1.

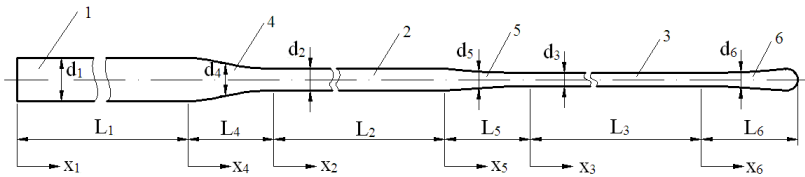


Рисунок 1. – Схема конструкции составного стержневого УЗВ

Волновод состоит из трех цилиндрических участков (ступеней) 1-3, для которых уравнение колебаний может быть проинтегрировано в квадратурах, а также переходных участков 4-5 и рабочего окончания (головки) 6, требующих численного решения уравнения колебаний. Рисунок носит иллюстративный характер: предложенные методы являются применимыми для волноводов с произвольным числом участков, в частности, для двух- и трехступенчатых волноводов с рабочим окончанием или без него.

Рассматриваются два типа задач:

1. Задача расчета (прямая задача), в которой требуется определить собственные частоты  $f$  колебаний волновода при заданных конструктивных параметрах.

2. Задача проектирования (обратная задача), в которой необходимо определить конструктивные параметры волновода, обеспечивающие резонанс его колебаний на заданной частоте  $f$ .

Поставленные задачи решаются путем прямого анализа дифференциальных уравнений колебаний, а также с помощью метода передаточных матриц (МПМ), который является более универсальным и удобным для инженерных расчетов.

В случае продольных колебаний под передаточной матрицей по параметрам  $\xi(x)$  и  $\xi'(x)$  (амплитудам колебательных смещений и относительных деформаций) понимают матрицу  $\mathbf{T}(x, f)$ , которая связывает линейной зависимостью параметры состояния волновода  $\xi(0)$  и  $\xi'(0)$  во входном сечении  $x=0$  с соответствующими параметрами  $\xi(x)$  и  $\xi'(x)$  в произвольно выбранном сечении:

$$\begin{pmatrix} \xi(x) \\ \xi'(x) \end{pmatrix} = \mathbf{T}(x, f) \begin{pmatrix} \xi(0) \\ \xi'(0) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Формально это соответствует представлению волновода в виде четырёхполюсника. Значения элементов передаточной матрицы зависят от профиля волновода, свойств его материала и частоты  $f$ .

Передаточная матрица удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d\mathbf{T}}{dx} = \mathbf{A}(x, f)\mathbf{T}(x, f), \quad \mathbf{A}(x, f) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k^2(f) & -2d'(x)/d(x) \end{pmatrix} \quad (2)$$

с граничным условием

$$\mathbf{T}(0, f) = \mathbf{I},$$

где  $k(f) = 2\pi f/c$  – волновое число для продольных колебаний,

$c$  – скорость продольной стержневой ультразвуковой волны в материале волновода,

$d(x)$  – диаметр волновода,

$\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Уравнение (2) имеет аналитическое решение вида  $\mathbf{T}(x, f) = \exp(\mathbf{A}(x, f)x)$  для элементов УЗАС простого профиля, в частности, для цилиндрических ступеней. В случае элементов сложного профиля, в частности для переходных участков и рабочего окончания, решение уравнения (2) находится численными методами.

Передаточная матрица составного стержневого волновода по любым непрерывным по координате  $x$  линейно-независимым параметрам состояния может быть определена как произведение передаточных матриц

$\mathbf{T}_i(x_i, f)$  его элементов по этим же параметрам, то есть для сечения с координатой  $x$ , принадлежащего  $i$ -му элементу волновода ( $i = 1..N$ )

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}(x, L_1, L_2, \dots, L_{i-1}, f) = \\ & = \mathbf{T}_i(x - (L_1 + L_2 + \dots + L_{i-1}), f) \mathbf{T}_{i-1}(L_{i-1}, f) \dots \mathbf{T}_1(L_1, f), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го элемента волновода (нумерация начинается с входного элемента),

$x_i$  – координата, отсчитываемая от входного сечения  $i$ -го элемента.

Условие резонанса продольных колебаний имеет вид

$$T_{21}^*(\mathbf{L}, f) = 0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{T}^*(\mathbf{L}, f) = \mathbf{T}(x, L_1, L_2, \dots, L_{N-1}, f)|_{x=L}$  – полная передаточная матрица, связывающая параметры состояния волновода в сечениях  $x = 0$  и  $x = L$  ( $L = L_1 + L_2 + \dots + L_N$ ),

$\mathbf{L} = (L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_N)$  – вектор конструктивных параметров волновода.

При решении задачи расчета вектор  $\mathbf{L}$  является заданным и из уравнения (4) определяется дискретный набор собственных частот  $f$ , соответствующих различным собственным формам колебаний, а при решении задачи проектирования при заданной собственной частоте  $f$  из уравнения (4) находятся возможные значения вектора конструктивных параметров  $\mathbf{L}$ . Решениями задачи проектирования является бесконечное множество векторов  $\mathbf{L}$ , однако, если рассматривать задачу оптимального проектирования, то есть потребовать, чтобы коэффициент усиления колебаний по амплитуде  $K(\mathbf{L}, f) = |\xi(L)/\xi(0)|$  принимал максимальное значение, то при рассмотрении ограниченного диапазона изменения параметров  $L_i$  решениями задачи оптимального проектирования будет являться конечное множество векторов  $\mathbf{L}$ . Коэффициент усиления продольных колебаний для резонансного волновода определяется формулой

$$K(\mathbf{L}, f) = |T_{11}^*(\mathbf{L}, f)|. \quad (5)$$

Изгибные колебания стержневых волноводов описываются передаточной матрицей размером  $4 \times 4$  в соответствии с порядком дифференциального уравнения колебаний.

Помимо составных стержневых УЗВ в качестве объектов исследования рассмотрены составные кольцевые волноводы и активные пьезоэлектрические элементы УЗАС.

Изгибные колебания кольцевых волноводов описываются передаточной матрицей размером  $6 \times 6$ , что соответствует порядку дифференциального уравнения колебаний.

Для активных пьезоэлектрических элементов УЗАС в передаточную матрицу дополнительно вводятся электрические параметры состояния (амплитуды тока  $I$  и напряжения  $U$ ), что в случае продольных колебаний соответствует представлению элемента в виде шестиполосника. Для согласования размеров передаточных матриц пассивных и активных элементов УЗАС размер матриц для пассивных элементов искусственно увеличивается до  $3 \times 3$  за счет введения электрических параметров состояния. Элементы передаточной матрицы  $T_{13}$ ,  $T_{23}$ ,  $T_{31}$ ,  $T_{32}$ , характеризующие электромеханическое преобразование, при этом принимаются равными нулю.

На основе приведенных выше основных соотношений для рассмотренных объектов исследования разработаны методы их расчета и проектирования, практические применения которых рассматриваются в пятой и шестой главах.

**Третья глава** посвящена разработке математических моделей и методов расчета параметров взаимодействия УЗАС с биологическими и технологическими средами. В частности, при оценке эффективности воздействия ультразвука на биологический объект или технологические среды важную роль играют параметры акустического поля, создаваемого УЗВ. В связи с этим разработан метод расчета параметров акустических полей, создаваемых стержневыми и кольцевыми УЗВ, основанный на совместном применении метода граничных элементов и метода зеркального источника. Сущность метода зеркального источника, применяемого при расчете акустических полей в жидком полупространстве, ограниченном плоскостью с акустическим импедансом  $Z$ , состоит во введении фиктивного зеркального источника акустических волн, расположенного симметрично к реальному источнику относительно границы полупространства. В случае  $Z \rightarrow 0$  (акустически мягкая граница) источники должны создавать противофазное акустическое давление, а при  $Z \rightarrow \infty$  (акустически жесткая граница) – синфазное. Результирующее акустическое поле, создаваемое реальным и фиктив-

ным источниками в однородном бесконечном пространстве, будет совпадать с акустическим полем, создаваемым реальным источником в ограниченном плоскостью полупространстве. Практическое применение разработанного метода для расчета параметров акустического поля, создаваемого стержневыми волноводами для ультразвуковой тромбэктомии в крови, рассматривается в пятой главе.

В ряде практических приложений, например, в УЗП, акустическое поле, генерируемое УЗВ, используется для создания контролируемых по величине и направлению сил. На любое тело, помещенное в акустическое поле, действуют давление излучения (радиационное давление), имеющее в отличие от акустического давления ненулевое среднее значение по времени, и связанная с ним радиационная сила. В общем случае радиационная сила зависит от средних по времени значений удельных (отнесенных к единице объема) потенциальной и кинетической энергий среды  $\langle E_P \rangle = \langle p^2 \rangle / 2\rho_0 c_0^2$  и  $\langle E_K \rangle = \rho_0 \langle v^2 \rangle / 2$ , где  $p$  – акустическое давление,  $v$  – колебательная скорость частиц среды,  $\rho_0$  – плотность среды,  $c_0$  – скорость звука в среде. Например, в УЗП радиационные силы, действующие со стороны акустического поля статора на поверхность ротора, могут использоваться для создания вращающего момента, определяемого выражением

$$\mathbf{M} = h \mathbf{e}_z \int_L (\langle E_K \rangle - \langle E_P \rangle) \cdot (x n_y - y n_x) \cdot dl = M_z \mathbf{e}_z, \quad (6)$$

где  $h$  – высота ротора,

$dl$  – элемент направляющей линии  $L$  боковой поверхности ротора,

$\mathbf{e}_z$  – единичный вектор, направленный вдоль оси вращения,

$n_x$  и  $n_y$  – компоненты внешней единичной нормали к боковой поверхности ротора.

Уравнение (6) используется в шестой главе в качестве основы для исследования динамики и условий работоспособности УЗП.

Важной задачей при расчете и проектировании кольцевых УЗВ терапевтического назначения является описание их взаимодействия с биологическим материалом, представляющим собой упругую среду. В связи с этим была разработана математическая модель взаимодействия кольцевых УЗВ с упругими биологическими средами, основанная на представлении биологического материала в виде винклеровской упругой среды с жесткостью, зависящей от порядка моды колебаний. Соб-



ственные частоты изгибных колебаний кольцевого волновода с учетом его взаимодействия с биологическим материалом могут быть определены из условия резонанса

$$\det \begin{pmatrix} \rho h \omega_n^2 - \frac{K_1 n^4}{R^4} - \frac{K_2}{R^2} - k_r(\omega_n) & -\frac{K_1 n^3}{R^4} - \frac{K_2 n}{R^2} \\ -\frac{K_1 n^3}{R^4} - \frac{K_2 n}{R^2} & \rho h \omega_n^2 - \frac{K_1 n^2}{R^4} - \frac{K_2 n^2}{R^2} - k_\theta(\omega_n) \end{pmatrix} = 0, (7)$$

где  $\rho$  – плотность материала волновода,

$R$  – радиус средней линии волновода,

$h$  – толщина волновода,

$K_1 = Eh^3/12(1-\nu^2)$ ,  $K_2 = Eh/(1-\nu^2)$  – коэффициенты жесткости волновода,

$E$  – модуль продольной упругости материала волновода,

$\nu$  – коэффициент Пуассона материала волновода,

$\omega_n$  – собственная циклическая частота, соответствующая изгибной моде колебаний  $n$ -го порядка.

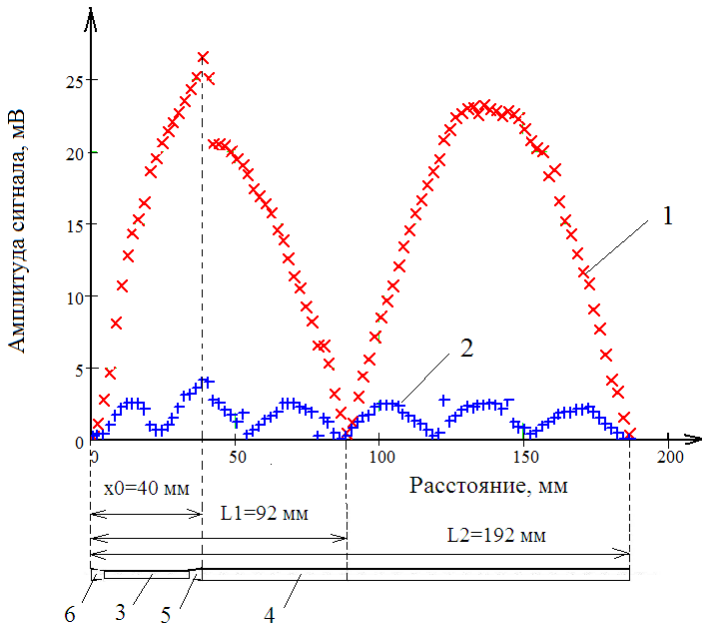
Биологический материал рассматривается как винклеровская упругая среда с тангенциальной и радиальной жесткостями  $k_\theta$  и  $k_r$ . Особенностью рассматриваемой модели является учет зависимости параметров винклеровской среды от порядка моды колебаний, что соответствует двустороннему характеру связи между упругими свойствами биологической среды и собственными частотами колебаний волновода (существует как влияние упругих свойств среды на собственные частоты, так и обратное влияние). На основе разработанной математической модели в пятой главе решается задача определения набора частот колебаний, обеспечивающего возможность терапевтического воздействия на охватываемый волноводом биологический материал в заданном диапазоне изменения диаметра.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям составных стержневых УЗВ.

Разработана методика экспериментальных исследований, основанная на измерении амплитуды внутренних сил в волноводах с помощью индукционных датчиков на основе эффекта обратной магнитострикции, представляющих собой плоскую спиральную катушку с центральным отверстием, в которое помещается исследуемый волновод: изменение намагниченности материала волновода в процессе колебаний

приводит к генерации в катушке ЭДС, зависимость которой от времени регистрируется с помощью осциллографа. С помощью закона Фарадея-Ленца и уравнений магнитоstrictionного эффекта показано, что чувствительность датчика по силе в В/Н пропорциональна магнитоstrictionной постоянной  $d_{33}$  материала волновода и частоте колебаний. Благодаря этому при высоких частотах колебаний (20..30 кГц) датчик позволяет получать достаточно большой по амплитуде сигнал (порядка десятков мВ) даже при малых амплитудах колебательных смещений (порядка мкм).

На рисунке 2 приведен пример распределения амплитуды выходного сигнала датчика по длине волновода.



**1 – амплитуда 1-й гармоники; 2 – амплитуда 3-й гармоники;  
3, 4 – ступени волновода; 5 – переходный участок; 6 – рабочее окончание**

**Рисунок 2. – Распределение амплитуды выходного сигнала датчика по длине волновода**

Объектом исследования служил двухступенчатый составной стержневой волновод из медицинской нержавеющей стали 08X18H10T длиной 235 мм (показано распределение амплитуды сигнала на участке волновода длиной 192 мм, что соответствует координате узловой точки

внутренних сил) с собственной частотой продольных колебаний 25,1 кГц. Шаг перемещения волновода относительно датчика (шаг сканирования) составлял 2 мм. Зависимость выходного сигнала датчика от времени имела негармонический характер: амплитуды гармоник определялись с помощью дискретного преобразования Фурье. На переходном участке волновода наблюдается увеличение амплитуды сигнала, вызванное концентрацией напряжений.

Для определения чувствительности по силе  $k_F = U_0(x)/F_0(x)$ , где  $F_0(x)$  – амплитуда внутренней силы в волноводе,  $U_0(x)$  – амплитуда выходного сигнала датчика, проводилось прямое измерение амплитуды колебательных смещений с помощью микроскопа в двух поперечных сечениях с координатами  $x = 0$  и  $x = L$ .

Чувствительность рассчитывалась по формуле

$$k_F = \frac{4}{\pi E (|\xi(L)| + |\xi(0)|)} \int_0^L \frac{U_0(x)}{(d(x))^2} dx. \quad (8)$$

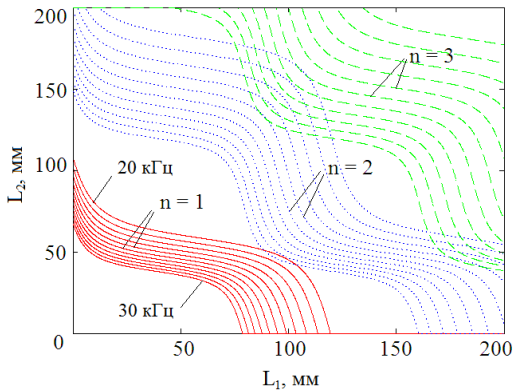
Чувствительность датчика на частоте 25,1 кГц составила 0,6 мВ/Н. При известном значении  $k_F$  распределение амплитуды колебательных смещений по длине волновода рассчитывается по формуле

$$\xi(x) = \xi(0) + \frac{4}{\pi k_F E} \int_0^x \frac{U_0(x)}{(d(x))^2} dx. \quad (9)$$

Распределение амплитуды колебательных смещений, рассчитанное на основе формулы (9) и приведенных на рисунке 2 экспериментальных данных, достаточно точно совпадает с собственной формой колебаний, рассчитанной с помощью МПМ: относительная погрешность определения коэффициента усиления составила 6,7 %, а погрешность определения координаты узловой точки колебательных смещений – 7,6 %, что подтверждает достоверность и корректность результатов, получаемых с помощью МПМ.

**Пятая глава** посвящена применению разработанных численно-аналитических методов для расчета и проектирования УЗАС, используемых в медицине, и верификации полученных результатов. В частности, разработанные методы применены для решения задач расчета и проектирования стержневых волноводов для ультразвуковой тромбо-

эктомии и исследования их взаимодействия с биологической средой. В качестве примера на рисунке 3 приведены рассчитанные с помощью МПМ резонансные кривые продольных колебаний двухступенчатого волновода для тромбозектомии из стали 08X18H10T для собственных частот  $f = 20..30$  кГц и мод колебаний с порядком  $n = 1..3$ .



**Рисунок 3. – Расчетные резонансные кривые продольных колебаний двухступенчатого волновода для тромбозектомии**

При заданной собственной частоте  $f$  резонансная кривая представляет собой кривую, описываемую концом вектора конструктивных параметров  $\mathbf{L}$ , удовлетворяющего условию резонанса (4). Каждая точка резонансной кривой дает пару значений конструктивных параметров  $(L_1, L_2)$ , обеспечивающих резонанс продольных колебаний волновода на заданной частоте  $f$ .

Для подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью МПМ, была рассмотрена задача расчета трехступенчатого составного волновода со сферическим рабочим окончанием. Относительное отклонение собственных частот продольных колебаний, рассчитанных с помощью МПМ, от частот, рассчитанных с помощью МКЭ и определенных экспериментальным методом, составило не более 3,5 %. Достоверность и корректность результатов, получаемых с помощью МПМ, также подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенными в четвертой главе.

На основе приведенных на рисунке 3 резонансных кривых и формулы (5) установлены связи между оптимальными значениями конструктивных параметров, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой  $f$  продольных колебаний. В частности, показано, что зависимости оптимальных значений конструктивных параметров от собственной частоты  $f$  описываются дробно-линейными функциями, причем для двухступенчатых волноводов оптимальные значения длин ступеней  $L_1$  и  $L_2$  различаются между собой не более чем на 1 %, то есть волноводы

с равными длинами ступеней имеют близкий к максимальному коэффициент усиления.

Для обеспечения взаимозаменяемости волноводов их собственная частота должна быть выдержана с определенной точностью, зависящей от добротности пьезоэлектрического преобразователя, с которым УЗВ согласуется по частоте. С учетом этого исследовано влияние погрешностей конструктивных параметров, возникающих при изготовлении волноводов, на собственную частоту их продольных колебаний. Влияние погрешностей описывается коэффициентами  $K_{\Delta f, L_1}$  и  $K_{\Delta f, L_2}$ :

$$\Delta f = K_{\Delta f, L_1}(f_{\text{ном}}, L_1, L_2)\Delta L_{1 \text{ техн}} + K_{\Delta f, L_2}(f_{\text{ном}}, L_1, L_2)\Delta L_{2 \text{ техн}}, \quad (10)$$

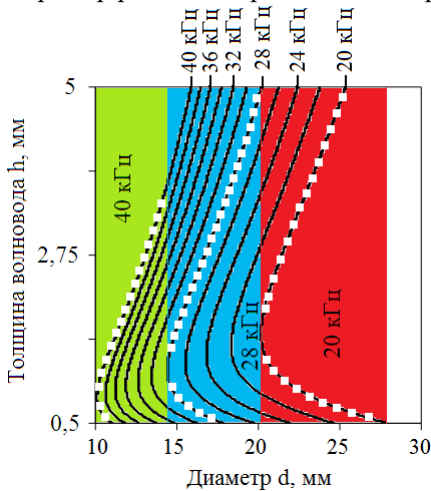
где  $\Delta f$  – отклонение собственной частоты от номинального значения  $f_{\text{ном}}$ , обусловленное технологическими погрешностями длин ступеней  $\Delta L_{1 \text{ техн}}$  и  $\Delta L_{2 \text{ техн}}$ .

Установлены связи между коэффициентами влияния погрешностей конструктивных параметров и номинальным значением  $f_{\text{ном}}$  собственной частоты продольных колебаний УЗВ. В частности, показано, что зависимости коэффициентов влияния от собственной частоты  $f_{\text{ном}}$  выражаются убывающими квадратичными функциями, причем коэффициенты влияния имеют отрицательный знак и увеличивающийся с ростом частоты модуль. Коэффициент влияния погрешности длины  $L_2$  высокоамплитудной ступени УЗВ независимо от частоты  $f_{\text{ном}}$  примерно в  $S_1/S_2$  раз больше коэффициента влияния погрешности длины  $L_1$ , где  $S_1$  и  $S_2$  – площади поперечного сечения ступеней УЗВ. Поэтому для обеспечения возможности настройки собственной частоты колебаний УЗВ путем удаления материала с низкоамплитудной ступени должен предусматриваться настроечный припуск  $\Delta L_{1 \text{ настр}} \geq (S_1/S_2 + 1)\Delta L_{\text{техн}}$  (предполагается, что  $\Delta L_{1 \text{ техн}} = \Delta L_{2 \text{ техн}} = \Delta L_{\text{техн}}$ ). При изменении собственной частоты от 20 до 30 кГц коэффициент влияния  $K_{\Delta f, L_1}$  изменяется от  $-55,3$  до  $-124,8$  Гц/мм.

Важной характеристикой взаимодействия волноводов с биологической средой является амплитуда создаваемого ими акустического давления, которая в случае волноводов для ультразвуковой тромбэктомии определяет эффективность кавитационного разрушения материала тромба. В связи с этим на основе разработанного в третьей главе мето-

да расчета параметров акустических полей исследовано влияние конструктивного исполнения рабочих окончаний стержневых УЗВ на величину амплитуды создаваемого ими акустического давления. В результате исследования установлено, что по сравнению с УЗВ со сферическим рабочим окончанием волноводы с плоским рабочим окончанием создают поле с более высокой амплитудой акустического давления: при частоте колебаний  $f = 25$  кГц и амплитуде колебательных смещений рабочего окончания  $\xi_0 = 10$  мкм максимальная расчетная амплитуда акустического давления составила для УЗВ с плоским рабочим окончанием  $p_0 = 148,6$  кПа, а для УЗВ со сферическим рабочим окончанием того же поперечного размера –  $p_0 = 82,6$  кПа. При частоте  $f = 25$  кГц расчетное значение порога кавитации для крови составляет  $p_{\text{пор}} = 131,2$  кПа и минимальная амплитуда колебательных смещений, которую должен создавать волновод с плоским рабочим окончанием для развития кавитации, составляет  $\xi_{\text{пор}} = \xi_0 p_{\text{пор}} / p_0 = 8,8$  мкм.

Для кольцевых УЗВ, применяемых для ультразвуковой терапии, на основе уравнения (7) рассчитаны зависимости между значениями конструктивных параметров (толщины  $h$  и внутреннего диаметра  $d$ , равного диаметру охватываемого волноводом объема биологической среды), обеспечивающие резонанс изгибных колебаний на различных частотах  $f$ . Пример расчетных резонансных кривых приведен на рисунке 4.



**Рисунок 4.** – Расчетные резонансные кривые изгибных колебаний кольцевого УЗВ

На основе приведенных на рисунке 4 резонансных кривых установлено, что при наличии ограничений на толщину волновода  $h$  заданному значению частоты колебаний  $f$  соответствует ограниченный диапазон изменения резонансного диаметра волновода и при необходимости воздействия на биологический материал в более широком диапазоне изменения диаметра требуется использование колебаний с дискретным набором частот, каждой из которых соответствует определенный поддиапазон изменения диаметра охватываемого волноводом объема

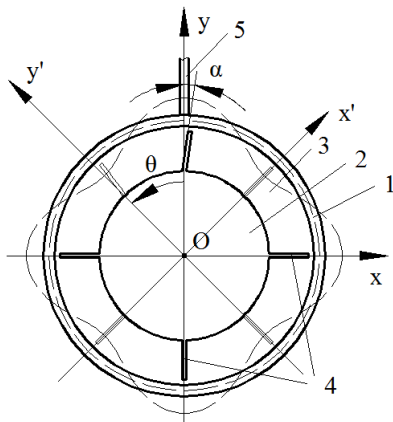
биологической среды. Например, возможность воздействия на биологический материал в диапазоне изменения диаметра 10..28 мм при ограничении толщины волновода диапазоном 0,5..5 мм обеспечивается при использовании трех дискретных частот колебаний 20, 28 и 40 кГц: частоте 40 кГц соответствует поддиапазон изменения диаметра 10..14,5 мм, 28 кГц – 14,5..20,2 мм, 20 кГц – 20,2..28 мм. Указанный набор частот является оптимальным в смысле минимизации числа входящих в него частот: увеличение этого числа нежелательно, так как приводит к усложнению конструкции ультразвукового генератора.

Результаты исследований внедрены в производственный процесс РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», где используются для расчета геометрических параметров составных стержневых волноводов для ультразвуковой тромбэктомии и кольцевых волноводов для ультразвуковой терапии опухолей. Ультразвуковые волноводы, производимые РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», разрешены Министерством здравоохранения Республики Беларусь к реализации и медицинскому применению на территории Республики Беларусь и используются в Государственном учреждении (ГУ) «Республиканский научно-практический центр «Кардиология», Учреждении здравоохранения (УЗ) «Минская областная клиническая больница» и ГУ «Республиканский клинический медицинский центр» Управления делами Президента Республики Беларусь. Потребность учреждений здравоохранения в волноводах для ультразвуковой тромбэктомии составляет около 50 штук в год.

**Шестая глава** посвящена применению разработанных численно-аналитических методов для расчета и проектирования УЗАС для использования в технике и разработке УЗП на основе кольцевых волноводов. В частности, разработанные методы использованы для решения задач расчета и проектирования УЗАС для установок ультразвукового и термозвукового присоединения (сварки) проволочных выводов изделий электронной техники. Решены задачи расчета волновода установки ЭМ-4320 (производство ОАО «Планар-СО») и задача проектирования модифицированной УЗАС повышенной частоты для установки ЭМ-4370. Погрешность определения собственной частоты продольных колебаний волновода установки ЭМ-4320 составила 3,4 %. Для установки ЭМ-4370 была спроектирована модифицированная УЗАС с резонансной частотой продольных колебаний 60 кГц, применение которой позволило расширить технологические возможности установки, а именно, увеличить диаметр алюминиевой проволоки присоединяемых выводов до 150 мкм, что в 3 раза превышает паспортное значение, и

обеспечить за счет этого возможность сборки электронных приборов средней мощности с допустимыми токами 1,5..3 А.

На основе анализа существующих конструкций УЗП и результатов математического моделирования предложен новый принцип построения УЗП вращательного движения, основанный на генерации вращающего момента за счет воздействия на геометрически асимметричный ротор акустических радиационных сил, создаваемых акустическим полем совершающего изгибные колебания кольцевого статора. Показано, что при использовании ротора асимметричной формы для реализации вращательного движения достаточно возбуждения в статоре стоячих ультразвуковых волн в отличие от УЗП симметричной конструкции, требующих использования бегущих ультразвуковых волн: это позволяет упростить конструкцию привода и управление его работой. Применение предложенного принципа позволило разработать оригинальную конструкцию УЗП, схема которой приведена на рисунке 5.



1 – статор (кольцевой волновод);  
2 – ротор; 3 – воздушный зазор;  
4 – лопасти ротора; 5 – стержневой волновод

**Рисунок 5. – Бесконтактный УЗП со статором в виде кольцевого волновода**

В отличие от УЗП контактного типа, в которых движение ротора обусловлено действием сил трения, вращательное движение ротора в разработанном приводе создается за счет воздействием на ротор акустических радиационных сил. Асимметричность конструкции ротора может создаваться за счет придания наклона одной из лопастей ротора по отношению к поверхностной нормали. При этом знак угла наклона  $\alpha$  (направление наклона) определяет направление вращения ротора, то есть направление вращения полностью определяется конструктивными параметрами привода.

Зависимость  $M_z(\varphi)$  момента акустических радиационных сил,

воздействующих на лопасти ротора, от угла поворота ротора  $\varphi$  рассчитывалась по формуле (6). Для исследования условий работоспособности УЗП было рассмотрено три модели:



1) Модель с асимметричным ротором и осесимметричным распределением амплитуды колебательных смещений по длине окружности статора.

2) Модель с симметричным ротором и неосесимметричным распределением амплитуды по длине окружности статора.

3) Модель с асимметричным ротором и неосесимметричным распределением амплитуды по длине окружности статора.

В результате расчета среднего по времени значения момента  $\langle M_z(\varphi) \rangle$  для трех типов моделей было установлено, что необходимое условие работоспособности привода  $\langle M_z(\varphi) \rangle \neq 0$  выполняется только в случае модели третьего типа, то есть для реализации условия работоспособности требуется одновременное обеспечение геометрической асимметрии ротора и неосесимметричного распределения амплитуды колебательных смещений по длине окружности статора.

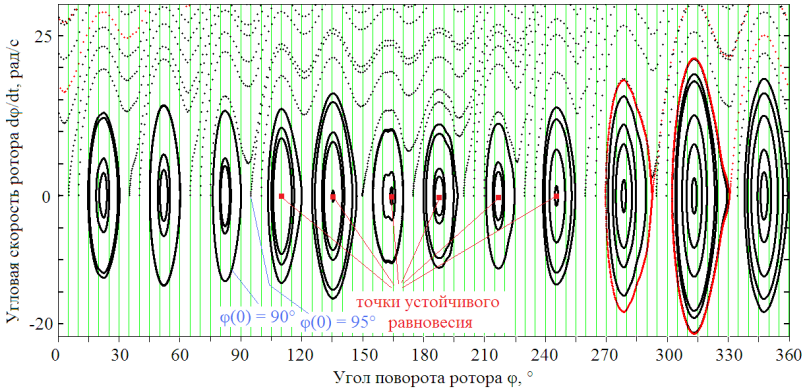
Влияние степени асимметрии на работоспособность и динамику привода исследовалось на основе уравнения вращательного движения

$$J_z \varphi''(t) = M_z(\varphi), \quad (11)$$

где  $J_z$  – момент инерции ротора относительно оси вращения.

Уравнение (11) в зависимости от начального положения ротора  $\varphi(0)$  (начальное значение угловой скорости принимается равным  $\varphi'(0) = 0$ ) может иметь как периодические решения, соответствующие качательным движениям ротора относительно начального углового положения, так и аperiodические решения, соответствующие вращательным движениям ротора. Пример фазовых траекторий движения ротора приведен на рисунке 6.

Замкнутые фазовые траектории, например, траектория, для которой  $\varphi(0) = 90^\circ$ , соответствуют качательным движениям ротора, а незамкнутые траектории, например, траектория, для которой  $\varphi(0) = 95^\circ$ , соответствуют вращательным движениям. Замкнутые фазовые траектории окружают точки устойчивого равновесия, существование которых является нежелательным, так как приводит к невозможности реализации вращательного движения ротора из некоторых начальных угловых положений.



**Рисунок 6. – Фазовые траектории движения ротора УЗП**

На основе результатов математического моделирования показано, что существование и число положений устойчивого равновесия могут контролироваться путем изменения степени асимметрии ротора. В частности, при использовании составного ротора, выполненного из двух частей, смещенных друг относительно друга на угол  $\Delta\theta = 180^\circ/n$ , где  $n$  – число узловых точек колебательных смещений статора, варьирование геометрических параметров лопастей позволяет достичь полного устранения положений устойчивого равновесия и обеспечить возможность вращательного движения ротора из произвольного начального положения.

Перспективным направлением применения разработанных в диссертации численно-аналитических методов является научное обоснование на их базе новых конструктивных схем построения УЗАС. В частности, дано научное обоснование новой конструктивной схемы построения УЗАС, основанной на использовании для усиления колебаний по амплитуде стержневых волноводов, отличающихся совместным применением геометрического профилирования и функционально-градиентного материала (ФГМ) с осевым градиентом механических свойств (модуля упругости и/или плотности). Установлены связи между оптимальными значениями конструктивных параметров волноводов из ФГМ, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой  $f$  их продольных колебаний. В частности, показано, что зависимости оптимальных значений конструктивных параметров от собственной частоты  $f$  описываются дробно-линейными функциями, а при оптимальных

значениях конструктивных параметров коэффициент усиления колебаний геометрически профилированным УЗВ из ФГМ повышается по сравнению с геометрически профилированным УЗВ из однородного материала до  $z_1/z_2$  раз, где  $z_1$  и  $z_2$  – волновое сопротивление материала для низкоамплитудной и высокоамплитудной частей волновода.

На базе разработанных численно-аналитических методов дано научное обоснование новой конструктивной схемы построения УЗАС, основанной на использовании для усиления колебаний по амплитуде кольцевых УЗВ одного из двух конструктивных исполнений:

1) УЗВ с окружным изменением площади поперечного сечения и/или механических свойств материала, работающие на одной из собственных частот изгибных колебаний;

2) УЗВ с постоянными по длине окружности параметрами, работающие в режиме нерезонансных вынужденных изгибных колебаний.

По сравнению со стержневыми УЗВ кольцевые волноводы имеют более простую конструкцию, более технологичны и обладают меньшими габаритными размерами и массой. Кольцевые УЗВ позволяют обеспечить значительные коэффициент усиления колебаний и ширину резонанса: для выполненного из стали 45 кольцевого УЗВ второго конструктивного исполнения с внутренним диаметром 10 мм и наружным диаметром 15 мм максимальное расчетное значение коэффициента усиления составило  $K = 280,7$ ; ширина резонанса при пороговом уровне коэффициента усиления  $K_{\text{пор}} = 10$  составила 2500 Гц при собственной частоте  $f = 21,3$  кГц. С учетом демпфирования колебаний реальное значение коэффициента усиления будет ниже расчетного, однако, как показывают экспериментальные исследования, кольцевые волноводы позволяют успешно выполнять ряд технологических операций, например, ультразвуковую размерную обработку хрупких материалов (исследования В.Т. Минчени, В.П. Лугового, И.В. Лугового).

Физический механизм усиления колебаний кольцевыми УЗВ первого конструктивного исполнения основан на изменении площади поперечного сечения и/или механических свойств материала и аналогичен механизму усиления колебаний стержневыми УЗВ с геометрическим профилированием и/или градиентом механических свойств материала. Как и для стержневых УЗВ, усиление обеспечивается при введении колебаний в участок с более высоким значением модуля упругости или площади поперечного сечения.

Усиление колебаний кольцевыми УЗВ второго конструктивного исполнения основано на сложении ряда собственных форм изгибных колебаний, одновременно возбуждаемых в УЗВ приложенной к входному

сечению сосредоточенной вынуждающей силой. Зависимость вынуждающей силы от угловой координаты  $\varphi$  описывается периодически повторяющейся  $\delta$ -функцией Дирака, ряд Фурье которой содержит бесконечное множество гармоник, что соответствует одновременному возбуждению в УЗВ ряда собственных форм колебаний различных порядков  $n$  с распределением амплитуды вида  $A_n \cos(n\varphi)$ . Наибольшую по модулю амплитуду  $A_n$  будут иметь собственные формы, соответствующие которым собственные частоты  $f_n$  имеют минимальное отклонение  $|f_n - f|$  от частоты  $f$  вынуждающей силы. При этом знак амплитуды будет зависеть от знака отклонения  $f_n - f$ . Результирующая амплитуда колебательных смещений во входном сечении УЗВ определяется как сумма знакопостоянного ряда амплитуд  $A_n$ , соответствующих возбуждаемым в УЗВ собственным формам колебаний, а результирующая амплитуда в выходном сечении – как сумма знакопеременного ряда амплитуд  $A_n$ , что дает для коэффициента усиления выражение

$$K = \left| \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_n \right| / \left| \sum_{n=0}^{\infty} A_n \right|.$$

Если все амплитуды  $A_n$  имеют одинаковый знак, то сумма знакопеременного ряда всегда меньше суммы знакопостоянного ряда, что соответствует  $K < 1$ . Однако в действительности знак амплитуд  $A_n$  зависит от знака отклонения  $f_n - f$  и не является постоянным, что дает  $K > 1$ .

Результаты исследований использованы в производственном процессе ОАО «Планар-СО» для расчета геометрических параметров стержневых УЗВ установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов изделий электронной техники. Оптимизация УЗВ установки ЭМ-4370 позволила расширить ее технологические возможности, а именно увеличить диаметр присоединяемых алюминиевых выводов до 150 мкм, что в 3 раза выше паспортного значения, что дает возможность сборки электронных приборов средней мощности с допустимыми токами 1,5..3 А. Установка ЭМ-4370 с оптимизированным волноводом поставлена в АО «Орбита» (г. Саранск, Российская Федерация) и АО «ВЗПП-С» (г. Воронеж, Российская Федерация). С помощью предложенной методики спроектирована партия УЗВ, внедренных в оборудование компании Changchun Guanghua Micro-Electronics Equipment Engineering Center Co., Ltd. (г. Чяньчунь, Китайская Народная Республика).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан метод расчета и проектирования УЗАС, основанный на применении комбинированного численно-аналитического подхода, включающего аналитическое решение уравнений колебаний для элементов УЗАС простого профиля (цилиндрического, конического, катеноидального, экспоненциального, гауссова или бесселева) и применение численных методов для элементов сложного профиля, что позволяет производить параметрический анализ и оптимизацию УЗАС с произвольным числом элементов произвольного профиля [6, 7, 31, 32].

2. На основе разработанного метода расчета и проектирования УЗАС получены решения задач расчета и проектирования волноводов для ультразвуковой тромбэктомии и волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов изделий электронной техники; установлены связи между оптимальными значениями конструктивных параметров волноводов для ультразвуковой тромбэктомии, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой продольных колебаний, а также связи между коэффициентами влияния погрешностей конструктивных параметров на собственную частоту и ее номинальным значением [1–8, 12, 14, 15, 19, 21, 23, 26, 28–32, 36, 37, 39, 44].

В частности, показано, что связи между оптимальными значениями длин ступеней  $L_{1\text{опт}}$ ,  $L_{2\text{опт}}$ ,  $L_{3\text{опт}}$  волноводов для ультразвуковой тромбэктомии и собственной частотой  $f$  их продольных колебаний описываются дробно-линейными зависимостями, причем для двухступенчатых волноводов значения  $L_{1\text{опт}}$  и  $L_{2\text{опт}}$  при заданной частоте  $f$  различаются между собой не более чем на 1 %, то есть волноводы с равными длинами ступеней имеют близкий к максимальному коэффициент усиления. Связи между коэффициентами  $K_{\Delta f, L_1}$ ,  $K_{\Delta f, L_2}$  влияния погрешностей длин ступеней на собственную частоту продольных колебаний  $f$  и ее номинальным значением описываются убывающими квадратичными функциями, причем коэффициенты имеют отрицательный знак, а их модуль возрастает с увеличением частоты. При этом независимо от частоты  $f$  коэффициент  $K_{\Delta f, L_2}$  примерно в  $S_1/S_2$  раз больше коэффициента  $K_{\Delta f, L_1}$ , где  $S_1$  и  $S_2$  – площадь поперечного сечения для низко- и высокоамплитудной ступеней УЗВ, то есть резонансная частота явля-

ется более чувствительной к погрешностям длины высокоамплитудной ступени волновода.

3. На основе разработанного метода расчета параметров акустических полей, создаваемых стержневыми УЗВ в жидких средах, установлены связи между конструктивным исполнением рабочих окончаний стержневых УЗВ и величиной амплитуды создаваемого ими акустического давления, которая в случае волноводов для ультразвуковой тромбэктомии является основным фактором, определяющим производительность кавитационного разрушения биологического материала [17, 18, 35].

В частности, установлено, что при равных поперечных размерах волноводы с плоским рабочим окончанием создают поле с более высокой по сравнению с волноводами со сферическим рабочим окончанием амплитудой акустического давления и, следовательно, более эффективно разрушают материал тромба: при частоте колебаний  $f = 25$  кГц и амплитуде колебательных смещений рабочего окончания волновода  $\xi = 10$  мкм максимальная расчетная амплитуда акустического давления, создаваемого волноводом с плоским рабочим окончанием, составила  $p_0 = 148,6$  кПа, что превышает порог кавитации для крови  $p_{\text{пор}} = 131,2$  кПа, а для волновода со сферическим рабочим окончанием амплитуда составила  $p_0 = 82,6$  кПа.

4. На основе математической модели колебаний кольцевых УЗВ с учетом взаимодействия с упругой биологической средой оптимизированы частоты колебаний УЗВ, обеспечивающие возможность воздействия на биологический материал в заданном диапазоне изменения диаметра охватываемого волноводом объема среды [9, 22, 27, 34].

В частности, установлено, что при наличии конструктивных ограничений на толщину волновода заданному значению собственной частоты  $f$  соответствует ограниченный диапазон изменения резонансного диаметра волновода и при необходимости воздействия на биологический материал в более широком диапазоне изменения диаметра требуется использование колебаний с дискретным набором частот, каждой из которых соответствует определенный поддиапазон изменения диаметра охватываемого волноводом объема биологической среды. Например, возможность воздействия на биологический материал в диапазоне изменения диаметра 10..28 мм при ограничении толщины волновода диапазоном 0,5..5 мм обеспечивается только при использовании набора из трех частот 20, 28 и 40 кГц, который является оптимальным в смысле минимизации числа входящих в него частот.

5. На основе результатов теоретических исследований влияния наличия асимметрии и ее характера (геометрическая асимметрия ротора и асимметрия колебаний статора) на работоспособность и динамику УЗП вращательного движения, основанного на генерации вращающего момента с помощью акустических радиационных сил, установлены требования к характеру асимметрии привода, выполнение которых необходимо для обеспечения его работоспособности; обоснована возможность управления динамикой привода, в частности, полного устранения положений устойчивого равновесия ротора, за счет асимметричного изменения его конструктивных параметров [10, 11, 13, 33, 38].

В частности, показано, что необходимыми условиями работоспособности привода являются одновременное наличие геометрической асимметрии ротора и асимметрии колебаний статора в форме неосесимметричного распределения амплитуды колебательных смещений по длине окружности статора. Полное устранение положений устойчивого равновесия ротора позволяет обеспечить возможность его вращательного движения из произвольного начального положения.

6. На основе результатов теоретических исследований усиления колебаний по амплитуде кольцевыми УЗВ с различным конструктивным исполнением (различными законами изменения площади поперечного сечения и механических свойств материала по длине окружности) и различными режимами функционирования (резонансные или нерезонансные колебания) установлены принципы усиления колебаний нерезонансными кольцевыми УЗВ с постоянными значениями параметров по длине окружности и резонансными кольцевыми УЗВ с окружным изменением параметров; дано научное обоснование применения кольцевых УЗВ в качестве элементов УЗАС, реализующих функцию усиления колебаний по амплитуде, что является качественно новым принципом построения УЗАС [16, 20, 24, 25, 40–43, 45].

В частности, показано, что для резонансных кольцевых УЗВ с окружным изменением параметров принцип усиления колебаний аналогичен принципу усиления колебаний геометрически профилированными стержневыми волноводами и неоднородными стержневыми волноводами с осевым изменением механических свойств материала. В случае нерезонансных кольцевых УЗВ с постоянными значениями параметров по длине окружности усиление колебаний происходит за счет сложения ряда собственных форм изгибных колебаний, одновременно возбуждаемых в волноводе под действием сосредоточенной вынуждающей силы.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Результаты исследований используются в производственном процессе РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». В частности, разработанные методы расчета и проектирования составных стержневых волноводов использованы для определения оптимальных значений геометрических параметров волноводов для ультразвуковой тромбэктомии, обеспечивающих максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде при заданной собственной частоте продольных колебаний. Расчетные значения геометрических параметров волноводов используются для управления процессом их формообразования методом электролитно-плазменной обработки. Предложенные методы расчета и проектирования кольцевых ультразвуковых волноводов использованы для расчета значений геометрических параметров кольцевых волноводов, применяемых для ультразвуковой терапии опухолей, обеспечивающих требуемую собственную частоту изгибных колебаний волновода с учетом его взаимодействия с биологической тканью. Расчетные значения геометрических параметров стержневых и кольцевых волноводов использованы для разработки конструкторской документации, в соответствии с которой осуществляется их производство (КД ИШПЖ.234875.000, ТУ ВУ 100232486.013-2007, КД ИШПЖ 71.00.00.000). Производимые ультразвуковые волноводы разрешены Министерством здравоохранения РБ к реализации и медицинскому применению на территории Республики Беларусь (регистрационные удостоверения № ИМ-7.93118/1003 и № ИМ-7.114888/1003) и используются в ГУ «Республиканский научно-практический центр «Кардиология», УЗ «Минская областная клиническая больница» и ГУ «Республиканский клинический медицинский центр» Управления делами Президента РБ. Потребность учреждений здравоохранения в волноводах для ультразвуковой тромбэктомии составляет около 50 штук в год, однако с учетом высокой частоты возникновения венозных тромбозов и увеличения числа минимально-инвазивных хирургических операций следует ожидать роста этой потребности.

2. Результаты исследований используются в производственном процессе ОАО «Планар-СО». В частности, разработанные методы расчета и проектирования составных ультразвуковых волноводов были использованы для оптимизации волноводов, применяемых в установках ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов для сборки изделий электронной техники. Область применения разработанных методик включает в себя модификацию волноводов



серийно выпускаемых установок присоединения выводов, в частности, в случае их изготовления из новых материалов, а также создание волноводов для новых типов установок, отличающихся резонансными частотами и другими эксплуатационными характеристиками. Оптимизация волновода ультразвукового преобразователя установки ЭМ-4370 позволила расширить технологические возможности установки, а именно, увеличить диаметр алюминиевой проволоки присоединяемых выводов до 150 мкм, что в 3 раза превышает паспортное значение, и обеспечить за счет этого возможность сборки электронных приборов средней мощности с допустимыми токами 1,5..3 А. Установка ЭМ-4370 с оптимизированным волноводом поставлена в АО «Орбита» (г. Саранск, Российская Федерация) и АО «ВЗПП-С» (г. Воронеж, Российская Федерация). С помощью предложенной методики была спроектирована партия волноводов ультразвуковых преобразователей, успешно внедренных в оборудование компании Changchun Guanghua Micro-Electronics Equipment Engineering Center Co., Ltd. (г. Чяньчунь, Китайская Народная Республика).

3. В соавторстве со специалистами Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова защищены патентами на изобретения способ и устройство для ультразвуковой терапии опухолей с применением кольцевых ультразвуковых волноводов [46, 47, 49]. Патентами на изобретения также защищены способ измерения амплитуды колебательных смещений прямым оптическим методом, предложенный в ходе проведения экспериментальных исследований стержневых волноводов для тромбоэктомии [48], и предложенная в работе конструкция ультразвукового привода [50].

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедр «Конструирование и производство приборов» и «Сопrotивление материалов машиностроительного профиля» Белорусского национального технического университета, где используются в курсах лекций «Приборы, аппараты и комплексы клинической диагностики, терапии и хирургии» для специальности 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов (заготовок)» для специальностей 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства» и 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты», «Математическое моделирование физических процессов» и «Методы и приборы технической диагностики» для специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики объектов».

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монография

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в медицине / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко. – Мн.: БНТУ, 2009. – 428 с.

### Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

2. Степаненко, Д.А. Применение компьютерных методов для проектирования элементов ультразвуковых колебательных систем / Д.А. Степаненко // Вестник БНТУ. – 2009. – № 2. – С. 52–56.

3. Минченя, В.Т. Линейные колебания двухступенчатого волновода-концентратора для ультразвукового тромболитика / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // Доклады НАН Беларуси. – 2009. – Т. 53, № 6. – С. 114–119.

4. Stepanenko, D.A. Modeling of flexible waveguides for ultrasonic vibrations transmission: longitudinal and flexural vibrations of non-deformed waveguide / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya // Ultrasonics. – 2010. – Vol. 50. – P. 424–430.

5. Stepanenko, D.A. Computer modelling and experimental studies of wire ultrasonic waveguides for minimally-invasive surgery / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, N.T. Minchenya, T.L. Stepanenko // Lékař a Technika. – 2010. – Vol. 40, No. 2. – P. 1–5.

6. Степаненко, Д.А. Применение метода передаточных матриц для исследования гибких ультразвуковых волноводов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Вестник БНТУ. – 2011. – № 1. – С. 25–31.

7. Степаненко, Д.А. Исследование продольных колебаний гибких ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 71–75.

8. Степаненко, Д.А. Оптимизация гибких волноводов для ультразвуковой тромбэктомии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2011. – № 3. – С. 100–106.

9. Study of the process of interaction between low-frequency ultrasound and biological tissue phantoms / A. Bubulis, V. Jūrēns, V.T. Minchenya, D.A. Stepanenko, A.I. Bobrovskaja, D.V. Chizh // Journal of Vibroengineering. – 2011. – Vol. 13, No. 3. – P. 586–589.

10. Степаненко, Д.А. Разработка и исследование нового типа бесконтактных ультразвуковых двигателей на основе принципа конструктивной асимметрии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Доклады НАН Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 5. – С. 105–111.

11. Stepanenko, D.A. Structural control of nonlinear dynamical behaviour of non-contact standing wave ultrasonic motor / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2011. – Vol. 14, No. 4. – P. 335–347.

12. Induction sensors for measurement of vibration parameters of ultrasonic surgical waveguides / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, A.P. Avtushko, K.A. Bogdanchuk, E.V. Dlusskaya, I.V. Yanovich, T.L. Stepanenko // Lékař a Technika. – 2012. – Vol. 42, No. 2. – P. 11–14.

13. Stepanenko, D.A. Development and study of novel non-contact ultrasonic motor based on principle of structural asymmetry / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya // Ultrasonics. – 2012. – Vol. 52. – P. 866–872.

14. Low frequency and high intensity ultrasound in vascular surgery: theory, instrumentation and possibilities of clinical application / A. Bubulis, I.E. Adzerikho, D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, M. Valaika, V. Veikutis, A. Pranskūnas, R. Unikis, K. Morkūnaitė // Journal of Vibroengineering. – 2012. – Vol. 14, No. 4. – P. 1833–1851.

15. Степаненко, Д.А. Методика расчета и возможные применения функционально-градиентных ультразвуковых волноводов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 5 (22). – С. 19–23.

16. Степаненко, Д.А. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, В.П. Луговой, И.В. Луговой // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 90–94.

17. Boundary element modeling of acoustic fields generated during ultrasonic angioplasty / A. Bubulis, D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, V. Veikutis, I.E. Adzerikho, R. Sakalauskas // Vibroengineering Procedia. – 2013. – Vol. 1. – P. 72–76.

18. Степаненко, Д.А. Моделирование акустических полей, создаваемых при ультразвуковой ангиопластике, методом граничных элементов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Наука и техника. – 2013. – № 6. – С. 79–83.

19. Stepanenko, D.A. Experimental modal analysis of ultrasonic surgical waveguides using effect of inverse magnetostriction / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, K.A. Bogdanchuk // Lékař a Technika. – 2015. – Vol. 45, No. 1. – P. 10–15.

20. Степаненко, Д.А. Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний / Д.А. Степаненко, И.В. Луговой, В.П. Луговой // Наука и техника. – 2016. – № 3. – С. 209–215.

### **Статьи в научных журналах**

21. Минченя, В.Т. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 6–16.

22. Минченя, В.Т. Моделирование ультразвуковых волноводов-инструментов для контроля механических свойств и терапевтического воздействия на биологические ткани / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко, А.И. Бобровская // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2. – С. 77–84.

23. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 6. – С. 72–78.

24. Степаненко, Д.А. Теоретическое обоснование возможности усиления ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко, А.С. Емельянова, М.А. Плещак, Н.В. Солодкая // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2017, 2. – 13 с.

25. Степаненко, Д.А. Исследование характеристик составных кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, А.С. Емельянова, М.А. Плещак, Н.В. Солодкая // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2018, 2. – 11 с.

### **Статьи в сборниках научных трудов**

26. Степаненко, Д.А. Собственные колебания ультразвуковых волноводов для минимально-инвазивной хирургии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, А.В. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика. – 2010. – Вып. 25. – С. 276–281.

27. Stepanenko, D.A. Theoretical and experimental studies of combined therapy of tumours with application of ultrasound / D.A. Stepanenko, V.T.

Minchenya, A.I. Bobrovskaya, N.I. Krutilina // AIP Conference Proceedings. – 2011. – Vol. 1433. – P. 597–602.

### **Статьи в сборниках материалов конференций и тезисы докладов**

28. Степаненко, Д.А. Применение САЕ-систем для автоматизированного проектирования ультразвуковых колебательных систем / Д.А. Степаненко // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2008 г.: в 4 т. / Редкол.: Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Мн., 2008. – Т. 1. – С. 344.

29. Минченя, В.Т. Анализ резонансных явлений в гибких волноводных системах с применением теорий Эйлера-Бернулли и Тимошенко / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко, Е.Н. Юрчик // Приборостроение-2009: материалы Второй междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. – Мн., 2009. – С. 247–248.

30. Bubulis, A. Semi-automatic modal analysis of flexible ultrasonic waveguides in ANSYS / A. Bubulis, V.T. Minchenya, D.A. Stepanenko // Приборостроение-2009: материалы Второй междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. – Мн., 2009. – С. 145–146.

31. Степаненко, Д.А. Расчет сложных ультразвуковых волноводных систем с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Приборостроение-2010: материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10-12 ноября 2010 г. – Мн., 2010. – С. 211–212.

32. Степаненко, Д.А. Проектирование ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2010 г.: в 4 т. / Редкол.: Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Мн., 2010. – Т. 2. – С. 173.

33. Minchenya, V.T. Applications of actuators on the basis of steerable resonance in engineering and medicine / V.T. Minchenya, D.A. Stepanenko // Belarus-Korea Science and Technology Seminar, Minsk, June 27, 2011. – Minsk, 2011. – P. 47–50.

34. Stepanenko, D. Theoretical and experimental studies of combined therapy of tumours with application of ultrasound / D. Stepanenko, V. Minchenya, A. Bobrovskaya, N. Krutilina // International Congress on Ultrasonics ICU 2011: Book of abstracts, Gdańsk, September 5-8, 2011. – Gdańsk, 2011. – P. 317.

35. Степаненко, Д.А. Применение метода граничных элементов в акустике / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Приборостроение-2011: материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16-18 ноября 2011 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2011. – С. 411–412.

36. Индукционные датчики для измерения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, А.П. Автушко, К.А. Богданчук, Е.В. Длусская, И.В. Янович // Приборостроение-2012: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 ноября 2012 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2012. – С. 375–377.

37. Калибровка индукционных датчиков для измерения параметров колебаний ультразвуковых волноводных систем / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, А.П. Автушко, К.А. Богданчук, Е.В. Длусская, И.В. Янович // Приборостроение-2012: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 ноября 2012 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2012. – С. 226–228.

38. Stepanenko, D. Modelling of non-contact ultrasonic motor by means of boundary element method / D.A. Stepanenko, V.V. Minchenya, K. Zimmermann, R.M. Asimov, V.T. Minchenya // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, October 7-10, 2012. – Dresden, 2012. – P. 2722–2725.

39. Степаненко, Д.А. Моделирование волноводных систем ультразвуковых установок присоединения выводов методами конечных элементов и передаточных матриц / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборостроение-2013: материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20-22 ноября 2013 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2013. – С. 374–376.

40. Степаненко, Д.А. Концентраторы ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с некруглым эксцентричным профилем / Д.А. Степаненко, В.П. Луговой, И.В. Луговой // Приборостроение-2015: материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25-27 ноября 2015 г.: в 2 т. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Т. 2. – Мн., 2015. – С. 142–144.

41. Степаненко Д.А. Концентраторы ультразвуковых колебаний на основе неоднородных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко // Приборостроение-2016: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23-25 ноября 2016 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2016. – С. 381–383.

42. Степаненко, Д.А. Усиление ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых концентраторов / Д.А. Степаненко // Техни-

ческая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы междунар. науч. конф., Витебск, 26-29 сентября 2016 г. – Витебск, 2016. – С. 140–142.

43. Степаненко, Д.А. Расчет кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, А.С. Емельянова, М.А. Плескач, Н.В. Солодка // Приборостроение-2017: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1-3 ноября 2017 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2017. – С. 199–200.

44. Степаненко, Д.А. Влияние погрешностей изготовления на эксплуатационные характеристики волноводов для ультразвуковой тромбэктомии / Д.А. Степаненко, К.А. Бунчук, А.С. Емельянова, М.А. Плескач, Н.В. Солодка // Приборостроение-2017: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1-3 ноября 2017 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2017. – С. 314–316.

45. Степаненко, Д.А. Оптимизация кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний / Д.А. Степаненко, А.С. Емельянова, М.А. Плескач, Н.В. Солодка // Приборостроение-2018: материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14-16 ноября 2018 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2018. – С. 328–329.

## Патенты

46. Способ комбинированной терапии саркомы у крысы: пат. 13765 Респ. Беларусь: МПК А61N 5/06, 7/00 (2009) / Д.А. Степаненко, Н.В. Пономаренко, Н.И. Крутилина, В.Т. Минченя, М.В. Дроздова; дата публ.: 30.10.2010.

47. Устройство для ультразвукового воздействия на опухоль: пат. 13801 Респ. Беларусь: МПК А61N 7/00 (2009) / Д.А. Степаненко, Н.В. Пономаренко, Н.И. Крутилина, В.Т. Минченя, М.В. Дроздова; дата публ.: 30.12.2010.

48. Способ оптической виброметрии: пат. 16329 Респ. Беларусь: МПК G01N 9/00 (2006) / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко; дата публ.: 30.08.2012.

49. Устройство для магнитоакустической терапии онкологического заболевания в эксперименте: пат. 17293 Респ. Беларусь: МПК А61N 2/04, 7/00 (2006) / Д.А. Степаненко, Д.В. Чиж, Н.И. Крутилина, Л.Б. Пархоменко, Д.В. Окунцев, В.Т. Минченя; дата публ.: 30.06.2013.

50. Бесконтактный ультразвуковой двигатель: пат. 17459 Респ. Беларусь: МПК H02N 2/10 (2006) / Д.А. Степаненко, Р.М. Асимов, В.Т. Минченя, В.В. Минченя, Х. Роппельт; дата публ.: 30.08.2013.

## РЭЗЬЮМЕ

Сцепаненка Дзмітрый Аляксандравіч

**РАЗЛІК І ПРАЕКТАВАННЕ УЛЬТРАГУКАВЫХ  
АКУСТЫЧНЫХ СІСТЭМ ДЛЯ ВЫКАРЫСТАННЯ  
Ў МЕДЫЦЫНЕ І ТЭХНІЦЫ**

**Ключавыя словы:** ультрагук, ваганні, акустычная сістэма, хвалявод, разлік, праектаванне, тэрапія, хірургія, прывод, зварка.

**Мэта працы:** удасканаленне метадаў разліку і праектавання ультрагукавых акустычных сістэм для выкарыстання ў медыцыне і тэхніцы (ультрагукавая тэрапія і хірургія, ультрагукавая зварка, ультрагукавыя прыводы) і навуковае абгрунтаванне новых канструктыўных схем пабудовы ультрагукавых акустычных сістэм і прылад на іх аснове.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** матэматычнае і камп'ютэрнае мадэліраванне, вымярэнне параметраў ваганняў з дапамогай бескантактавых датчыкаў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** прапанаваны новыя метады разліку і праектавання ультрагукавых гальных сістэм і разліку параметраў ствараемых імі акустычных палей; вызначаны сувязі паміж аптымальнымі геаметрычнымі параметрамі састаўных стрыжнёвых хваляводаў і ўласнымі частотамі іх ваганняў і уплыў формы рабочых канчаткаў хваляводаў на амплітуду акустычнага ціску; абгрунтавана выкарыстанне кальцавых хваляводаў для узмацнення ультрагукавых ваганняў па амплітудзе і вызначаны яго механізмы; абгрунтаваны новы прынцып стварэння ультрагукавых прыводаў вярчальнага руху і вызначаны умовы іх працаздольнасці; абгрунтаваны спосаб кіравання дынамікай ультрагукавога прывода шляхам змянення ступені геаметрычнай асіметрыі.

**Рэкамендацыі па выкарыстанню, вобласць прымянення:** вынікі даследаванняў выкарыстоўваюцца ў вытворчых працэсах Рэспубліканскага іннавацыйнага унітарнага прадпрыемства «Навукова-тэхналагічны парк БНТУ «Палітэхнік» і ААТ «Планар-СО» для разліку і праектавання хваляводаў для ультрагукавой тромбаэктаміі, хваляводаў для ультрагукавой тэрапіі пухлін і хваляводаў устаноўкаў ультрагукавога і тэрмагукавога далучэння дротаў вывадаў.



## РЕЗЮМЕ

Степаненко Дмитрий Александрович

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ**

**Ключевые слова:** ультразвук, колебания, акустическая система, волновод, расчет, проектирование, терапия, хирургия, привод, сварка.

**Цель работы:** совершенствование методов расчета и проектирования ультразвуковых акустических систем для использования в медицине и технике (ультразвуковая терапия и хирургия, ультразвуковая сварка, ультразвуковые приводы) и научное обоснование новых конструктивных схем построения ультразвуковых акустических систем и устройств на их основе

**Методы исследования и использованная аппаратура:** математическое и компьютерное моделирование, измерение параметров колебаний с помощью бесконтактных датчиков.

**Полученные результаты и их новизна:** предложены новые методы расчета и проектирования ультразвуковых колебательных систем и расчета параметров создаваемых ими акустических полей; установлены связи между оптимальными геометрическими параметрами составных стержневых волноводов и собственными частотами их колебаний и влияние формы рабочих окончаний волноводов на амплитуду акустического давления; обосновано применение кольцевых волноводов для усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде и установлены его механизмы; обоснован новый принцип создания ультразвуковых приводов вращательного движения и установлены условия их работоспособности; обоснован способ управления динамикой ультразвукового привода путем изменения степени геометрической асимметрии.

**Рекомендации по использованию, область применения:** результаты исследований используются в производственных процессах Республиканского инновационного унитарного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» и ОАО «Планар-СО» для расчета и проектирования волноводов для ультразвуковой тромбэктомии, волноводов для ультразвуковой терапии опухолей и волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проводочных выводов.

## SUMMARY

**Stepanenko Dmitry Aleksandrovich**

**MODELING AND DESIGN OF ULTRASONIC  
ACOUSTIC SYSTEMS FOR APPLICATION  
IN MEDICINE AND ENGINEERING**

**Keywords:** ultrasound, vibration, acoustic system, waveguide, modeling, design, therapy, surgery, actuator, welding.

**Purpose of study:** improvement of modeling and design methods of ultrasonic acoustic systems for application in medicine and engineering (ultrasonic therapy and surgery, ultrasonic welding, ultrasonic actuators) and scientific motivation of novel design schemes of ultrasonic acoustic systems and devices on their basis.

**Methods of study and equipment used:** mathematical and computer modeling, measurement of vibration parameters by means of non-contact sensors.

**Obtained results and their novelty:** new methods of design and modeling of ultrasonic vibratory systems and calculation of parameters of acoustic fields created by them are suggested; relations between optimal geometric parameters of compound bar waveguides and natural frequencies of their vibration and effect of shape of waveguides' working terminations on amplitude of acoustic pressure are determined; application of ring waveguides for amplification of amplitude of ultrasonic vibrations is proved and causes of amplification are determined; new principle of design of rotary ultrasonic actuators is proved and conditions of their workability are determined; method of control of ultrasonic actuator's dynamics by means of changing degree of geometric asymmetry is proved.

**Recommendations on application, application field:** results of study are used in industrial processes of Republican innovative unitary enterprise "Scientific and technological park of BNTU "Polytechnic" and JSC "Planar-SO" for modeling and design of waveguides for ultrasonic thrombectomy, waveguides for ultrasonic therapy of tumors and waveguides for machines of ultrasonic and thermosonic joining of wire leads.